

О.И. ДРАЧЕВ, Г.В. ТАРАНЕНКО, В.А. ТАРАНЕНКО, А. СВИЦЬ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ

Дается обоснование метода вибрационного сверления отверстий инструментом с переменной жесткостью. Рассматриваются конструкции сверлильной головки с регулируемой жесткостью, волноводов, преобразующих энергию процесса резания в комплексные крутильно-продольные колебания режущего инструмента. Представлены схема экспериментального стенда, методика и результаты исследований в виде АЧХ колебаний инструмента в различных направлениях при традиционном и вибрационном сверлении глубоких отверстий. Приведены сравнительный анализ и результаты повышения точности обработки при вибрационном сверлении.

Ключевые слова: вибрационное сверление, автоколебания, волновод, преобразователь, точность обработки, эффективность.

Для интенсификации сверления глубоких отверстий (повышения производительности, точности, качества обработанной поверхности) разработаны и апробированы различные способы и средства технологического воздействия на заготовку и инструмент, в том числе и автоматического управления параметрами процесса сверления [1]. Другое направление базируется на использовании управляемых колебаний элементов технологической системы (ТС), как правило, инструмента. Некоторые исследователи [2] используют внешние источники колебательного движения, действие которых направлено, как правило, на повышение точности обработки, при этом частота колебаний инструмента достигает несколько тысяч герц. Недостатками принудительного возбуждения колебаний инструмента являются: необходимость использования специального оборудования с вибраторами; при сверлении режущим инструментом с длинным податливым стеблем закон движения режущих кромок не соответствует закону накладываемых вибраций, и их эффект ослабляется или прекращается. Другие методы вибрационного сверления [3] основаны на использовании энергии автоколебательных движений элементов замкнутой технологической системы и служат, в основном, для дробления стружки, а рабочие частоты находятся в пределах нескольких сотен герц.

Обоснование метода вибрационного сверления инструментом с переменной жесткостью.

Относительные колебания заготовки и инструмента в радиальном направлении ухудшают точностные показатели обработанного отверстия. Особенно опасно наступление резонанса при частотах, соответствующих собственным изгибным колебаниям заготовки или инструмента, при котором резко увеличивается амплитуда радиальных относительных смещений. Относительные продольные колебания заготовки и инструмента способствуют дроблению стружки, повышению точности и снижению шероховатости при сверлении отверстий. При обработке пластичных материалов это приводит к образованию нароста на инструменте, а в случае, когда твердость обрабатываемого материала одного порядка с твердостью материала инструмента,

происходит выкрашивание режущих кромок. Колебания в направлении резания в общем случае наиболее благоприятны для повышения точности и снижения шероховатости обработанной поверхности. Учитывая, что при сверлении поверхность резания является винтовой, вибрация инструмента в крутильном направлении приводит к повышенному износу инструмента по задней поверхности, которая будет периодически с частотой крутильных колебаний контактировать с поверхностью резания.

Частота и амплитуда применяемых вибраций могут быть различными для разных целей. Для дробления стружки применяются колебания в низкочастотном диапазоне – до 200 Гц. Высокочастотные (200...1500 Гц) и ультразвуковые (свыше 15 кГц) вибрации оказывают качественное влияние на механизм стружкообразования и используются для улучшения обрабатываемости материалов. Если в качестве источника вибраций используются автоколебания инструмента в процессе резания, их частота и амплитуда либо не регулируются, либо изменяются при настройке оборудования за счет подбора упругого элемента заданной жесткости.

Конструкция сверлильной головки с переменной жесткостью. Для сверления отверстий (в том числе глубоких) в маложестких осесимметричных деталях типа вала, гильзы, тонкостенной втулки и т. п. с использованием комплексных крутильно–продольных автоколебаний инструмента на станках токарного типа была разработана конструкция сверлильной головки с переменной жесткостью инструмента. В основу конструкции входит волноводный преобразователь (ВП) в виде борштанги со сквозным винтовым пазом. Для регулировки жесткости предлагается использовать принцип перемещения “сплошного сечения” [4] при изменении вылета сверла. Головка для вибрационного сверления с использованием автоколебаний (рис.1) устанавливается на суппорт токарного станка.

Сверлильная головка содержит корпус 1. Инструмент (не показан) устанавливается в коническое гнездо 2 резонатора комплексных колебаний 3 ВП, жестко закрепленного в ползуне 4 по коническому хвостовику 5. Ползун 4 с резонатором комплексных колебаний 3 имеет возможность осевого перемещения относительно корпуса 1 при помощи винта 6. Фиксация положения ползуна 4 с резонатором комплексных колебаний 3 относительно корпуса 1 происходит при помощи конических штифтов 7 и крышки 8.

Механизм вибрационной обработки достигается за счет применения в конструкции сверлильной головки резонатора комплексных колебаний 3 – ВП – упругого элемента, преобразующего энергию процесса резания в комплексные крутильно–продольные колебания режущего инструмента, характеризующиеся определенной частотой и амплитудой. Вибрации генерируются за счет упругого элемента ВП с относительно низкой жесткостью в крутильном и осевом направлениях, представляющего собой переходную втулку специфической формы для установки сверла. Конструкция преобразователя содержит сквозной винтовой паз, который может быть различной модификации (рис. 2).

Изменение его вылета – длины консольной части - обеспечивает возможность регулировки амплитуд и частот вибраций инструмента при обработке в некоторых пределах и, следовательно, оптимизации процесса сверления по критерию точности, производительности, стойкости инструмента и т.д. Регулировка достигается за счет изменения рабочей длины волновода, то есть длины паза до “сплошного сечения”. Для создания “сплошного сечения”

предлагается использовать два конических штифта, которые вставляются с натягом в паз в рабочем состоянии сверлильной головки и располагаются в нем с зазором в состоянии регулировки рабочей длины волновода.

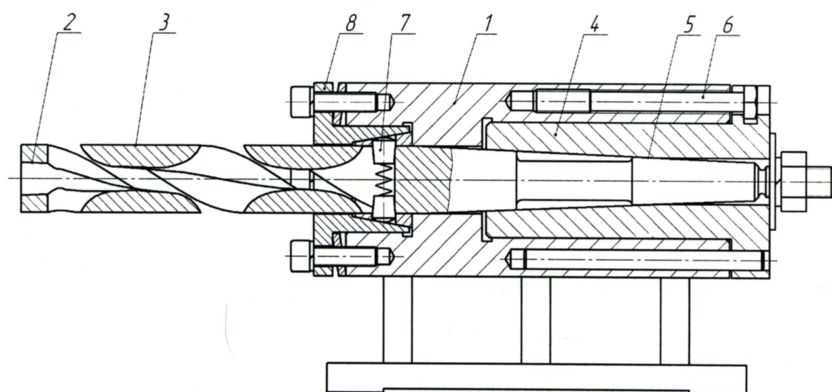


Рис. 1. Сверлильная головка с регулируемой жесткостью

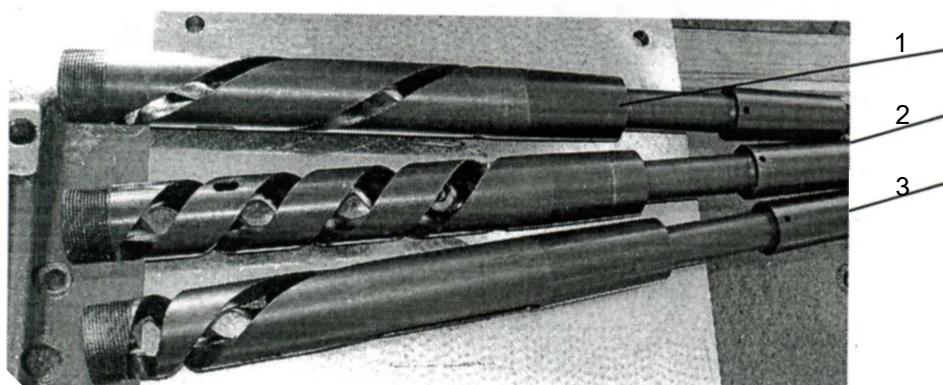
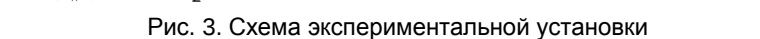


Рис. 2. Вспомогательные элементы для сверл (ВП):
1, 2 – с равномерным шагом паза, 3 – с переменным шагом

Экспериментальные исследования процесса вибрационного сверления. Для апробации способа вибрационного сверления была разработана установка, показанная на рис.3. Помимо вибросверлильной головки 2, установленной на суппорте токарного станка 1 (мод. 16K20), в технологическую систему входят система дополнительных опор – самоцентрирующихся гидролюнетов 3 [5, 6], установленных на станине станка при помощи кронштейна (их число подбирается исходя из длины и диаметра заготовки); измерительно-записывающая система из двух токовихревых датчиков ENTLY-NEVADA 4, связанных через многоканальный аналого-цифровой преобразователь P A/C (E440 L-Card) с цифровым осциллографом, установленным на PC 7.

Заготовка представляла собой прутки диаметром $d = 22 \text{ мм}$, длиной 240 мм из стали 40Х ГОСТ 4543-71. Инструмент – стандартное спиральное сверло диаметром $d = 16 \text{ мм}$, длина режущей части 110 мм , материал режущей части Р6М5Ф3. Был проведен эксперимент по



1) конфигурация ВП принимает два значения V_1 и V_2 , где V_1 - ВП с постоянным шагом

2) длина рабочей части (вылет) ВП принимает три значения: $l_1=100 \text{ мм}$, $l_2 = 140 \text{ мм}$, $l_3 = 190 \text{ мм}$.

Выходными факторами эксперимента являются: точность размеров, радиальное биение

При сверлении отверстий спиральным сверлом с использованием ВП значения осевой силы

204

В процессе сверления отверстия датчиками измерялись зазоры в направлении y – поперечные смещения инструмента (рис.3). Поперечное смещение в направлении y определяется разностью показаний датчика и начального зазора δ_0 : $\delta_y = \delta_2 - \delta_0$.

Угол закручивания ВП определялся, исходя из разности показаний датчиков: $\delta_\varphi \approx (\delta_1 - \delta_2) / R$ [rad], где R – расстояние от датчика 4.1 до горизонтальной координатной плоскости xOy (рис.3). Информация с двух датчиков поступает на ПА/С (E440 L-Card), в котором она преобразуется в цифровой вид и передается на цифровой осциллограф, где обрабатывается, выводится на экран и сохраняется в виде текстового файла в постоянном запоминающем устройстве. Спектральный анализ проводился в автоматическом режиме программным обеспечением для цифрового осциллографа PC_Lab – 2000. Точностные параметры обработанного отверстия измерялись относительно наружной цилиндрической поверхности детали, которая является технологической базой на операции сверления.

Эксперимент состоял из двух этапов – по модификациям ВП (B_1 и B_2). Каждый этап разделялся на три серии опытов по величине вылета ВП (l_1, l_2, l_3). В каждой из серий проводилось по три опыта с разной величиной скорости резания (V_1, V_2, V_3). Для исключения влияния различных случайных неучтенных факторов на результат эксперимента каждый опыт проводился по три раза.

В ходе анализа полученных результатов были выявлены случаи возникновения автоколебаний в процессе резания. Анализировались амплитудно – частотные характеристики колебаний в диапазоне 0...4000 Гц.

Интенсивные колебания в процессе сверления на частотах от 1000 до 3000 Гц возникали в крутильном и продольном направлениях при использовании ВП с неравномерным шагом винтового паза. При этом наблюдалось совпадение резонансных (пиковых) частот крутильных и продольных колебаний в рассматриваемом частотном диапазоне (рис.4).

Крутильно–продольные колебания обусловлены рядом факторов. Первый резонансный пик комплексных колебаний соответствует частоте вращения заготовки (4...10 Гц). Амплитуда колебаний на этой частоте зависит от несимметричности заточки инструмента, неуравновешенности заготовки и относительного смещения оси вращения заготовки и оси инструмента. Второй пик соответствует частоте стружкообразования (колеблется в зависимости от скорости резания и коэффициента усадки стружки в пределах 400...500 Гц). При определенных условиях возможно возникновение устойчивых комплексных крутильно–продольных автоколебаний (частота при разной жесткости ВП 1100, 1580, 2080, 2880 Гц). Их частота определяется характеристиками динамической системы процесса сверления и не зависит от частоты вращения заготовки. Амплитуда автоколебаний зависит как от жесткости подсистемы инструмента, так и, в значительной степени, от скорости резания. На амплитудно–частотных характеристиках продольных и крутильных колебаний инструмента в процессе резания присутствуют резонансные пики на одних и тех же частотах (1580, 2000, 2880 Гц); при этом на АЧХ изгибных колебаний резонансных пиков, соответствующих этим частотам, не

отмечается. Это позволяет утверждать, что такое колебательное движение происходит по винтовой линии, то есть является крутильно-продольным.

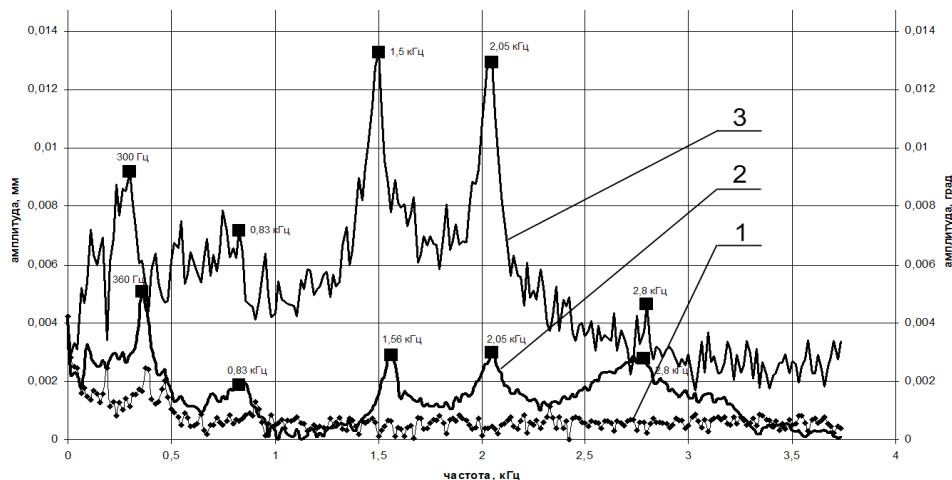


Рис. 4. АЧХ колебаний подсистемы инструмента в различных направлениях:
1 – поперечном (мм); 2 – осевом (мм); 3 – крутильном (град)

Рост частоты вращения заготовки и, соответственно, скорости резания приводит, во-первых, к линейному росту частоты первой гармоники процесса, которая связана с частотой вращения напрямую; во-вторых, к линейному росту кратных частот, амплитуда которых в ряде случаев больше амплитуды первой гармоники; в-третьих, к линейному росту частоты гармоники, связанной с частотой стружкообразования.

На автоколебания в крутильно-продольном направлении с частотой 1...2 кГц скорость резания влияния не оказывает. Изменение вылета ВП через изменение жесткости влияет на собственные частоты подсистемы инструмента и на частоту автоколебаний: при увеличении вылета жесткость и соответствующие частоты относительных колебаний уменьшаются. Применение ВП с равномерным шагом паза не приводило к таким результатам. Не наблюдалось высокочастотных комплексных колебаний инструмента. В изгибном направлении интенсивных колебаний на частотах выше 200...300 Гц не возникало. Изгибные колебания характеризовались наличием максимальной амплитуды на частоте, соответствующей частоте вращения заготовки. Также довольно высокое значение амплитуды соответствовало частотам, кратным частоте вращения. Возникновение интенсивных крутильно-продольных колебаний приводило к снижению пиковой амплитуды в поперечном направлении по сравнению с базовым вариантом – сверление без ВП (рис.5).

Это связано с обеспечением прерывистого процесса резания и демпфированием поперечных колебаний. Был определен технологический режим обработки сверлением, обеспечивающий максимальную точность обработанного отверстия (радиальное биение 12 мкм, точность размера – 7...8 квалитет, непрямолинейность оси 0,01/100 мм) и шероховатость обработанного отверстия в пределах Ra 5 мкм. Этот режим характеризуется наличием продольно-крутильных автоколебаний (1100, 1580, 2000 Гц) с амплитудой, близкой к размеру

зерна материала заготовки (3...5 мкм). АЧХ изгибных колебаний характеризуются малой амплитудой и равномерным спектром.

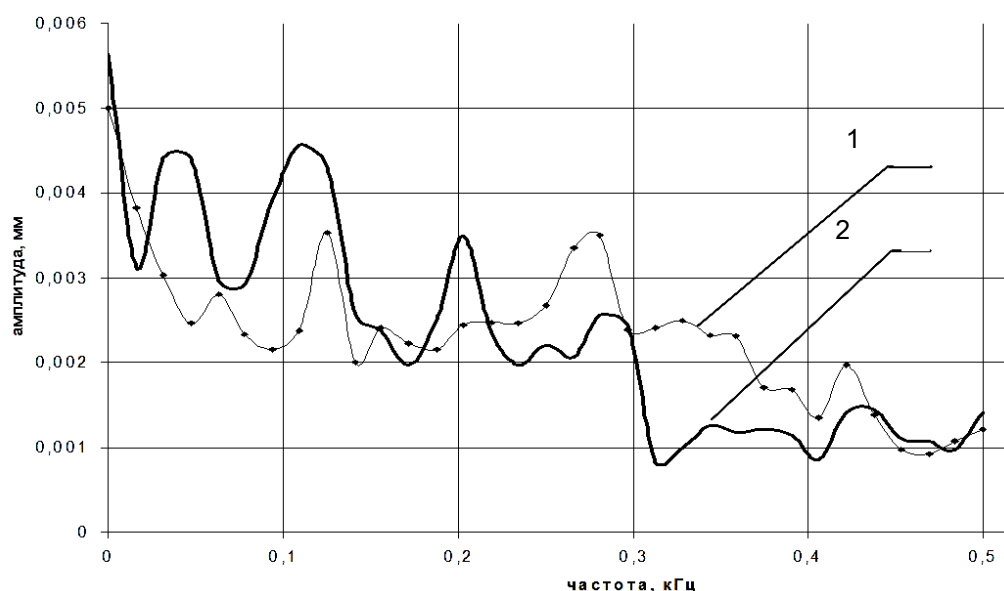


Рис. 5. АЧХ поперечных колебаний инструмента при различной обработке:
1 – традиционная обработка; 2 – обработка с ВП

Анализ круглограмм (рис.6) выявил технологический режим, при котором наблюдается минимальное биение ($\Delta = 12$ мкм) профиля отверстия образца относительно технологической базы – наружной поверхности: модификация ВП – В₁ (с неравномерным шагом паза); вылет - $l_2 = 140$ мм; частота вращения заготовки $n_3 = 400$ об/мин. Этот образец также характеризуется минимальными значениями увода и разбивки отверстия, малой амплитудой поперечных колебаний, наличием интенсивных крутильно-продольных колебаний.

Повышение точности связано с реализацией механизма вибрационного резания и снижением сил резания, в том числе и ее поперечной составляющей. На этом режиме зафиксировано наибольшее снижение сил резания, характеризующееся минимальным значением нагрузки на приводах главного движения и подачи. Это связано со снижением сопротивления резанию в результате реализации механизма вибрационного резания с оптимальным для данных условий сочетанием амплитуд крутильной и продольной составляющих колебаний, их частотами. При этом обработка по базовому варианту без применения ВП характеризовалась точностью 9...10 квалитет, радиальное биение отверстия 0,08...0,1 мм, шероховатость поверхности отверстия Ra 12,5 мкм.

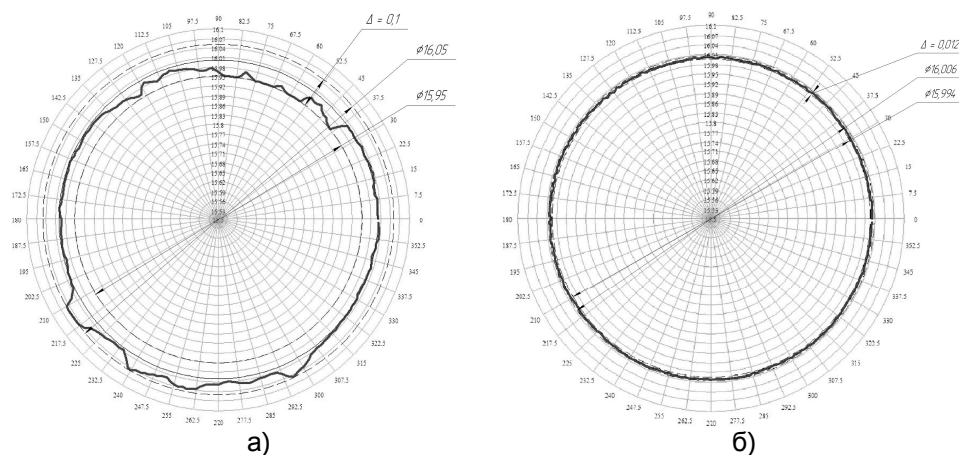


Рис. 6. Сравнительный анализ круглограмм просверленных отверстий:
 а - традиционное сверление ($n = 400 \text{ об/мин.}$), б - сверление с ВП
 ($l = 140 \text{ мм}$, $n = 400 \text{ об/мин.}$)

Заключение. При использовании ВП с переменным шагом паза в процессе резания возникают комплексные (крутильно-продольные) колебания инструмента. Причиной поперечных относительных колебаний заготовки и инструмента, в основном, является отклонение расположения оси вращения детали и оси инструмента. Амплитуда поперечных колебаний снижается при наличии устойчивых крутильно-продольных колебаний вследствие обеспечения прерывистости процесса резания, снижения сил резания и демпфирования поперечных смещений.

Выявлены общие закономерности зависимости спектра частот относительных крутильно-продольных и поперечных колебаний колебаний заготовки и инструмента в процессе резания от частоты вращения и вылета ВП. Определен технологический режим обработки сверлением, обеспечивающий максимальную точность (радиальное биение 12 мкм , точность размера 7...8 квалитет, непрямолинейность оси $0,01/100 \text{ мм}$) и шероховатость обработанного отверстия в пределах $Ra \ 5 \text{ мкм}$, то есть точность обработки повысилась на порядок по сравнению с обработкой без ВП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тараненко В.А., Левченко А.И.** Управление процессом сверления глубоких отверстий малого диаметра.-Politechnika Opolska: Opole, 2003. – 128 с.
2. **Подураев В.Н.** Обработка резанием с вибрациями.-М.: Машиностроение, 1970. – 350 с.
3. **Кумабэ Д.** Вибрационное резание: Пер с яп. С.Л. Масленникова / Под ред. И. И. Портнова, В. Белова. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
4. Патент № 2169058. Устройство для обработки глубоких отверстий / **О. И. Драчев, Д. А. Расторгуев, О. В. Бойченко.** -2001.- Бюл. № 17.

5. **Drachow O., Taranenko W.** Technologia modułowa wytwarzania osiowosymetrycznych wałów długowymiarowych // Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej NR 230 MECHANIKA, Z. 67 - Modułowe Technologie i Konstrukcje w Budowie Maszyn. –Rzeszyw, 2006. – S. 47 – 50.
6. **Драчев О. И., Тараненко, Г. В., Тараненко В. А.** Экспериментальные исследования стабилизации оси маложесткой детали при использовании самоцентрирующих люнетов // Автоматизация: Проблемы, Идеи, Решения: Материалы междунар. научн.-техн. конф., г. Севастополь, 8-13 сентября 2008 г. - Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2008. – С. 135 – 139.

ТГУ, СевНТУ, ЛТУ, г. Тольятти, г. Севастополь, г. Люблин, Россия, Украина, Польша.
Материал поступил в редакцию 11.01.2008.

Օ.Ի. ԴՐԱՉԵՎ, Գ.Վ. ՏԱՐԱՆԵՆԿՈ, Վ.Ա. ՏԱՐԱՆԵՆԿՈ, Ա. ՍՎԻՑ

ԽՈՐ ԱՆՑՔԵՐԻ ԹՐԹՈՒՄՇԱԿՄԱՆ ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅԱՆ ԲԱՐՁՐԱՑՈՒՄԸ

Հիմնավորվում է փոփոխական կոշտությամբ անցքերի թրթռագայլիկոնման եղանակը: Ներկայացված են կարգավորվող կոշտությամբ գայլիկոնման գլխույկի և ալիքատարների կոնստրուկցիաները, որոնք կտրման գործընթացի էներգիան փոխակերպում են կտրող գործիքի պտտա-երկայնական տատանումներով: Ներկայացված են փորձարարական ստենդի սխեման, ավանդական և թրթռումներով խոր անցքերի գայլիկոնման հետազոտությունների արդյունքները և մեթոդաբանությունը՝ գործիքի տարբեր ուղղություններով տատանումների ԱՀԲ-ի տեսքով: Բերված են թրթռագայլիկոնման մշակման ճշտության բարձրացման արդյունքները ու համեմատական վերլուծությունը:

Առանցքային քաներ. թրթռագայլիկոնում, ավտոտատանումներ, ալիքատար, փոխակերպիչ, մշակման ճշտություն, արդյունավետություն:

O.I. DRACHOV, G.V. TARANENKO, V.A. TARANENKO, A. SWIC

VIBRATING EFFICIENCY INCREASE PROCESSING OF DEEP APERTURES

The reason of using vibratory method for deep holes drilling is introduced. The construction of the drilling head with changing rigidity as well as the construction of wave converter and the model of research stand are presented. Results of experimental research and the comparative analysis of accuracy coefficients for conventional and vibratory drilling with the use of wave converters are shown.

Keywords: vibrating drilling, self-oscillations, wave guide, converter, accuracy of processing, efficiency.